第 38 卷第 5 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.5
2018 年 3 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201704070596
廖文婷,邓红兵,李若男,郑华.水利工程对坝下径流的影响——以葛洲坝、三峡水利枢纽为例.生态学报,2018,38(5):1750-1757.
Liao W T, Deng H B, Li R N, Zheng H.Effects of dams on runoff in the lower reaches: A case study of the Gezhouba hydro-project and the Three Gorges project.Acta Ecologica Sinica,2018,38(5):1750-1757.

水利工程对坝下径流的影响
——以葛洲坝、三峡水利枢纽为例

廖文婷[1,2],邓红兵[1,2],李若男[1,2],郑　华[1,2,*]
1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京　100085
2 中国科学院大学,北京　100049

摘要:水利工程建设在给人类带来抗旱防洪效益、发电效益、航运效益、养殖等效益的同时,也对河流水文动态产生了一系列的影响,主要表现为对径流的调节。基于宜昌站 1890—2014 年径流数据,综合采用径流集中度、集中期和相位差分析等多种方法,分析了水利工程建设对径流年内分配以及枯水期的影响。结果表明:宜昌站径流集中度呈现缓慢下降趋势并在 2004 年发生突变,2003 年以后径流集中度相对于 2003 年以前下降 0.06(下降幅度为 12.98%),说明葛洲坝水利枢纽、三峡工程建成以后宜昌站径流在年内分配变得平缓,洪峰被有效削弱,且三峡工程对宜昌站径流集中度减少的贡献率大于葛洲坝水利枢纽(贡献率分别为 92.03%和 7.97%);葛洲坝和三峡水利枢纽建成后,宜昌站径流重心提前 8d(集中期从 8 月 9 日提前至 7 月 31 日);宜昌站进入枯水期的时间提前约 20d(三峡大坝建设以前,宜昌站在 12 月 7—11 日进入枯水期,建设以后在 11 月底进入枯水期),水利工程对水文过程的影响可能导致下游枯水期污染加剧和湿地生境提前缩小,进而影响下游水环境和湿地生物多样性。上述结果定量揭示了水利工程对水文过程的影响及其潜在生态效应,可为认识水利工程的生态影响以及流域生态环境变化的驱动因素提供科学依据。

关键词:三峡工程;葛洲坝水利枢纽;枯水期;集中度;集中期;流量历时曲线(FDC)

Effects of dams on runoff in the lower reaches: A case study of the Gezhouba hydro-project and the Three Gorges project

LIAO Wenting[1,2], DENG Hongbing[1,2], LI Ruonan[1,2], ZHENG Hua[1,2,*]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*
2 *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: The Yangtze basin is rich in water and biological resources, providing essential natural conditions for economic development in the southern region of China. Various water conservation facilities have been constructed in the basin to perform water resource scheduling and electrical energy conversion. By 2009, there were 46000 reservoirs built in the basin, with a total irrigation capacity of more than 120 billion m^3. These projects were associated with benefits in terms of drought flood control, power generation, shipping, breeding, and so on, but also had both positive and negative effects on runoff. Therefore, watershed water security not only affects economic development and ecological security in the southern region of China, but also is an inevitable requirement for sustainable development. We participated in an academic conference on soil and water conservation and disaster prevention and mitigation in the Yangtze River economic belt, during which several scholars and experts extensively discussed the current problems in the Yangtze River basin. Some experts pointed out that

基金项目:中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STS-ZDTP-03);国家重点研发计划项目(2016YFC0503401)
收稿日期:2017-04-07;　　**修订日期**:2017-06-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhenghua@ rcees.ac.cn

the construction of the Three Gorges project and other water conservancies would lead to an advance in the timing of the dry season in the middle and lower reaches of the Yangtze River, resulting in increased water pollution, changes in the habitats of migratory birds, and a series of ecological problems. Although low water levels and floods are classified into the extreme hydrology category, early drought has no significant impact on human activity, and is not as well studied as floods. With the growth of the social economy and population explosion, the gap between the supply and demand of water resources is increasing. Especially in the dry season, several ecological problems are experienced, including increased water pollution caused by the reduction in runoff and river blanking caused by excessive use of low water resources. Thus, it is necessary to study the effects of water conservancy projects on the dry season. After the conference, we conducted a field visit and a survey along the Yangtze River area, with a view to use the data to effectively assess the impact of water conservancy construction during the dry season. Since the construction of the Three Gorges project has attracted greater attention, its water security and ecological benefits have always been the focus of discussions. Therefore, we selected Yichang station as the study area and analyzed the impacts of the Gezhouba hydro-project and the Three Gorges project on hydrological dynamics. Based on the runoff data of Yichang station from 1890 to 2014, the effects of water conservancy construction on the distribution of runoff and the dry season were analyzed using runoff concentration degree and period and phase difference analysis. The results showed that the runoff concentration of Yichang station tended to decrease, with a mutation occurrence in 2004. After 2003, the runoff concentration decreased by 0.06 (a decrease of 12.98%) from that before 2003. This indicated that after the completion of the Gezhouba water conservancy project and the Three Gorges project, the runoff distribution in Yichang station over the year became gentle and the peak floods were effectively weakened. The rate of contribution of the Three Gorges project toward decreasing the runoff concentration degree in Yichang station (92.03%) was greater than that of the Gezhouba water conservancy project (7.97%). After the Gezhouba and Three Gorges projects were completed, the runoff concentration period and beginning of the dry season in Yichang station have advanced (with advances of 8 and 20 days, respectively). Following completion of the water conservation projects, changes to the water-carrying capacity of the environment and wetlands in the lower reaches will take place earlier than previously, resulting in increased water pollution, changes in wetland biodiversity, and several ecological problems. Our results revealed the influence of the water conservation projects on hydrological processes and their potential ecological efficiency, providing a scientific basis to better understand the influence of water conservation projects on runoff.

Key Words: Three Gorges project; The Gezhouba hydro-project; dry season; C_{RCP}: Runoff concentration period (C_{RCP}); C_{RCD}: Runoff concentration degree (C_{RCD}); flow duration curve (FDC)

水利工程给人类带来防洪、发电、航运效益的同时,也对流域生态环境产生一些负面影响。许多学者围绕水利工程的生态效应开展了大量研究,对其水文效应的研究较少。Deitch 等使用 GIS 水文模型分析水利工程对径流的影响,结果表明水利工程在干旱年份对径流的影响约为 40%,在常规年份影响程度为 50%[1]。陆国宾等对丹江口水库以下径流研究发现,水库运行对下游径流的影响主要是径流的年内分配,但影响随距离的增加而减弱,仙桃站汛期流量比例由 1967 年以前 75.7%下降至 1967 年以后 65.4%,减少了洪水发生的几率[2]。水利工程和下垫面作为人类活动的两个主要因素,二者对径流的影响程度难以区分,孙新国等基于 SWAT 模型模拟水利工程和下垫面变化下的径流变化,结果发现中水利工程对径流的影响比重为 91.3%,下垫面变化的影响只占 8.7%[3]。除了对径流的影响,水利工程对河流含沙量和下游生境也造成了不少影响。2003—2006 年期间约 60%的泥沙被三峡拦截,导致大坝下游泥沙量减少,将造成下游河道侵蚀、发生形态学的改变[4];谢永宏等研究表明洞庭湖泥沙淤积速度减缓,有利于增强洞庭湖调蓄空间,延长洞庭湖寿命,但同时也改变了洞庭湖植物群落演替方式,使群落演替方式主要以慢速方式进行,演变模式为:水生植物-苔草-芦苇-木本植物[5];这些以水利工程水文效应为对象的研究主要集中在对洪水、含沙量及生态效益的研究,对于枯水期影响的研究涉及较少。枯水和洪水虽同属于水文学极值研究范畴,但由于枯水早期对人类未产生较大影响,研究进展落后于洪水。随着社会经济的发展,人口激增,水资源供需矛盾日益突出,尤其在枯水季节,产生了由于径流减少引起的水污染加重的问题,过度利用枯水资源造成河流断流等生态问题,需要加强水利工

程对枯水期影响的研究。

本文以葛洲坝水利枢纽和三峡工程为研究对象,以宜昌水文站 118 年(1890—2014 年,缺失 1940—1945,1961)日径流资料为基础,分析水利工程建设对宜昌站径流分配和枯水期时间的影响,其目标是:揭示葛洲坝水利枢纽和三峡工程对长江干流径流年内分配和枯水期的影响方向和程度及可能带来的生态问题,为流域水安全和水资源管理提供基础信息。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

长江流域是我国水资源最为丰富的流域之一,2014 年长江区水资源总量高达 10150.3 亿 m^3,居全国首位,超过全国水资源总量 1/3[6]。虽然长江区水资源总量很大,但是受季风性气候影响,汛期流量约占径流总量的 70%,难以利用,在非汛期,季节性缺水与发电航运等用水矛盾仍然十分突出。水库是调节河道水流、解决季节性和工程性缺水问题的主要途径,为了满足日益增长的水利需求,流域修建了很多大型水利工程,至 2009 年年底,长江流域已建成各类水库 4.6 万座,总兴利库容 1200 多亿 m^3,其中大型水库 166 座,总兴利库容 966 亿 m^3[7]。峡工程是迄今世界上综合效益最大的水利枢纽,位于长江上游,距下游葛洲坝水利枢纽工程 38km,是具有防洪、发电、航运、供水和补水等综合效益的水资源多目标开发工程,水库正常蓄水位 175m,总库容 393 亿 m^3,正常运行后可使荆江河段防洪标准由约十年一遇提高到百年一遇[8]。宜昌水文站是距离葛洲坝水利枢纽和三峡水利最近的水文站,位于三峡工程下游 43km 处[9],也是长江干流最早设立的水文站之一,拥有较长时间实测水文资料。

1.2 研究方法

1.2.1 径流年内分配表征指标

(1)集中度(C_{RCD})和集中期(C_{RCP})

集中度和集中期是使用向量法表征径流年内分配的两个重要指标。基本思想是将 1 年内各月的径流量看作向量,径流量的大小即为向量的长度,所处月份为向量的方向[10]。集中度是指各月径流以向量的方式累加,和向量大小占年径流量的百分数,其意义是反映径流量在年内的集中程度;集中期是指和向量的方位(以正切角度表示),反映全年径流集中的重心所出现的时间[11],集中期角度越大表示径流重心出现的时间越晚。

具体计算方法:

X 轴分量的和:
$$R_X = \sum_{i=1}^{12} R_{Xi} = \sum_{i=1}^{12} R_i \sin \theta_i$$

Y 轴分量的和:
$$R_Y = \sum_{i=1}^{12} R_{Yi} = \sum_{i=1}^{12} R_i \cos \theta_i$$

和向量:
$$R = \sqrt{R_X^2 + R_Y^2}$$

集中度:
$$C_{RCD} = \frac{R}{\sum_{i=1}^{12} R_i} \times 100\%$$

集中期:
$$C_{RCP} = \arctan\left(\frac{R_X}{R_Y}\right)$$

式中,R_i 为第 i 月径流向量;R_{Xi} 为第 i 月径流向量在 X 轴方向上的分量;R_{Yi} 为第 i 月径流向量在 Y 轴方向上的分量。

(2)径流集中度突变分析方法(M-K 突变检验)

M-K abrupt test 是非参数统计分析法,国内外学者常用来分析水文变量的趋势变化和突变现象[12-13],其优点是变量不需要服从一定的分布,而且检验精度高。M-K 突变检验可以检验时间序列数据发生突变的时间,运用该方法可以明确径流集中度发生突变的时间。

1.2.2　枯水期时间变化

(1)枯水期流量确定方法——FDC(Flow duration curve)曲线

流量历时曲线(FDC)是反映径流分配的一种曲线,根据研究目的不同,可以选择以日、月、季度为间隔,形成不同的历时曲线[14],反映不同季节或时期径流分配。本文采用综合日流量历时曲线,这种历时曲线能真实地反映流量在多年期间的历时情况[15]。流量历时曲线是枯水研究中提供最多信息的方法,在水资源开发、环境保护等实际工作中,经常采用 FDC 低端部分流量作为设计枯水流量[16]。在以不间断河流为对象的研究中,一般将频率 70%—90%以下的流量认为是枯水流量,但具体的取值视该流域水文情况设定。本文参考宜昌站枯水期研究相关文献[17]和枯水期相关报道[18],选取流超频率 65%对应的流量(Q65)为宜昌枯水期流量上限阈值,作为研究宜昌站枯水期(即宜昌站流量低于枯水期流量上限阈值)时间的分布的基础。

计算宜昌站多年平均日流量并在海森频率格纸上绘制 FDC 曲线(图 1),图中纵坐标是宜昌站多年平均日流量,横坐标是流超频率(exceedance frequency),表示等于或超过某一特定流量的时间占比[19]。研究选择 65%对应的流量(Q65 = 6536m^3/s)作为枯水期阈值,宜昌站径流低于这个阈值即认为宜昌站处于枯水期,用于探究宜昌站枯水期时间上的分布。

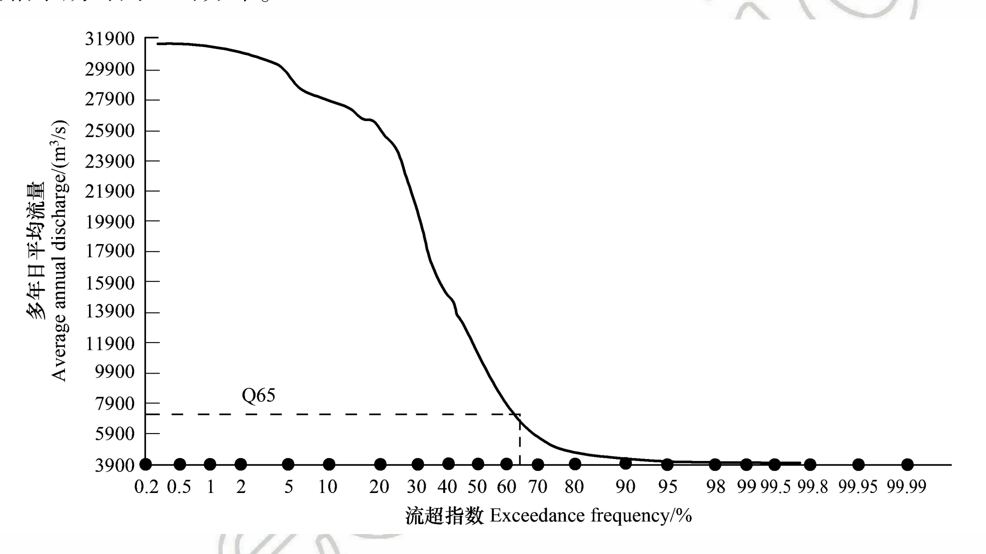


图 1　宜昌站多年平均日流量历程曲线

Fig.1　Flow duration curve of daily water discharge in Yichang

Q65:表示流超频率 65%对应的流量

(2)枯水期时间分布分析——相位差、统计频率

通过绘制水利工程建设前后多年平均日流量过程曲线,可以客观的展示建坝前后径流在日尺度上的分配。由于水库蓄水对径流的调节作用,将引起枯水流量出现的相对位置不同,形成相位差。若用 $t_{蓄水前}$,$t_{蓄水后}$分别表示水利工程蓄水前后河流进入枯水期的时间(用 1 年中第 t 天表示),如果 $t_{蓄水前}>t_{蓄水后}$,则表示枯水期开始时间提前,$t_{蓄水前}-t_{蓄水后}$就是枯水期提前的天数。

计算每一年宜昌站进入枯水期的时间,并对建坝前后枯水期开始时间分别进行频次统计,频率最高对应的时间段就是该时期枯水期最可能发生的时间。

2　结果与分析

2.1　宜昌站径流年内分配特征

2.1.1　集中度

水利工程建设是影响河流径流集中度最主要的因素[20],根据水利工程完工时间(1981 年葛洲坝截流工程胜利合龙,2003 年三峡工程建设完成开始蓄水)可以将研究时段分为 3 个时期:1954—1980(缺 1961)、

1981—2002、2003—2014(图 2)。近 60 年来,宜昌集中度总体呈现下降趋势,2014 年径流集中度与 1954 年相比下降幅度为 30.15%,说明径流在年内的分配趋于均匀。前两个时期(1954—1980 年,1981—2002 年)下降趋势相近(斜率分别为-0.0014 和-0.0019),说明葛洲坝水利枢纽对径流集中度影响较小;第 3 个时期(2003—2014 年)径流集中度下降趋势明显(斜率为-0.0069),说明三峡工程对宜昌站径流年内分配影响较大。

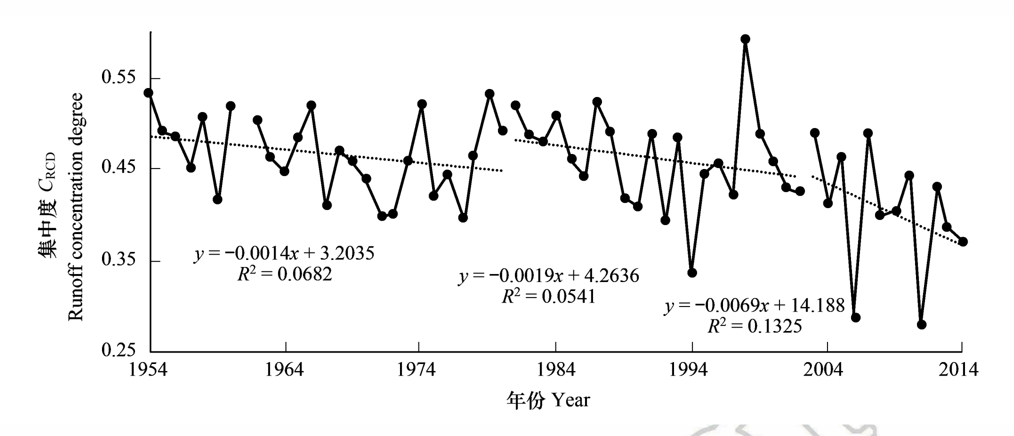


图 2 宜昌站(1954—2014)径流集中度年际变化图

Fig.2 Time series of annual C_{RCD} in Yichang

宜昌站径流集中度年际变化结果与宜昌站径流集中度 M-K 突变分析的结果一致(图 3),1954—2014 年宜昌站径流集中度只有 2004 年一个突变点,与三峡工程 2003 年 6 月 1 日开始蓄水的时间点相吻合,说明三峡工程的建成较大程度上改变了宜昌站径流的年内分配。

2.1.2 集中期

宜昌站 60 年径流集中期年际变化(图 4)表明:宜昌站径流集中期 1954—1980 年呈现微弱上升趋势(斜率为 0.0489)。葛洲坝建成以后,集中期开始提前(斜率为-0.3427),三峡大坝建设以后,这种径流重心提前趋势更为明显(斜率为-0.8583)。

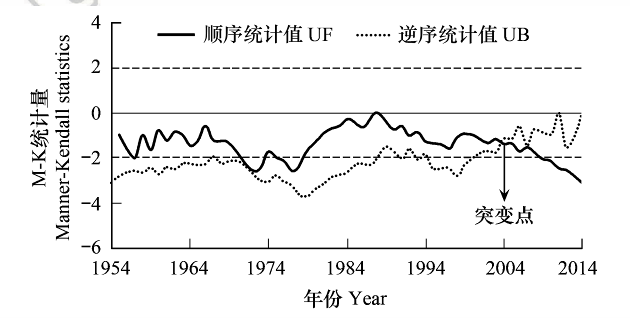


图 3 宜昌站年径流集中度突变点

Fig.3 Change point at C_{RCD} year in Yichang

2.2 水利工程对宜昌站枯水期开始时间的影响

2.2.1 枯水期开始时间相位差

分别计算宜昌站 3 个研究时期日均流量并绘制日均流量过程曲线(图 5),日均流量低于 Q65 的天数大致分布在一年中第 1—109 天和第 337—365 天,枯水期历时约 4 个半月。1890—1980 年枯水期从第 345 天(12 月 10 日)开始;1981—2002 年枯水期开始时间从第 342 天(12 月 07 日),较上一时期提前了 3d;2003—2014 年枯水期开始时间从第 337 天(12 月 02 日),较 1981—2002 年提前 5d。三峡工程建成以后宜昌站进入枯水期的时间要比葛洲坝水利枢纽建成以前提前 8d(图 5)。

2.2.2 枯水期开始时间频率统计

以 5d 为间隔,统计 3 个研究时期宜昌站进入枯水期时间的频次并绘制频率分布图(图 6),1890—1980 年和 1981—2002 年进入枯水期的时间都在 12 月 07 日到 12 月 11 日之间,2003—2014 年枯水期开始时间在 11 月 17 日—11 月 11 月 21 日,枯水期相对前两个时期,提前约 20d。

3 讨论与结论

通过对比分析 3 个时期径流集中度和集中期可以发现,宜昌站 1954—1980 年和 1981—2002 年径流年内

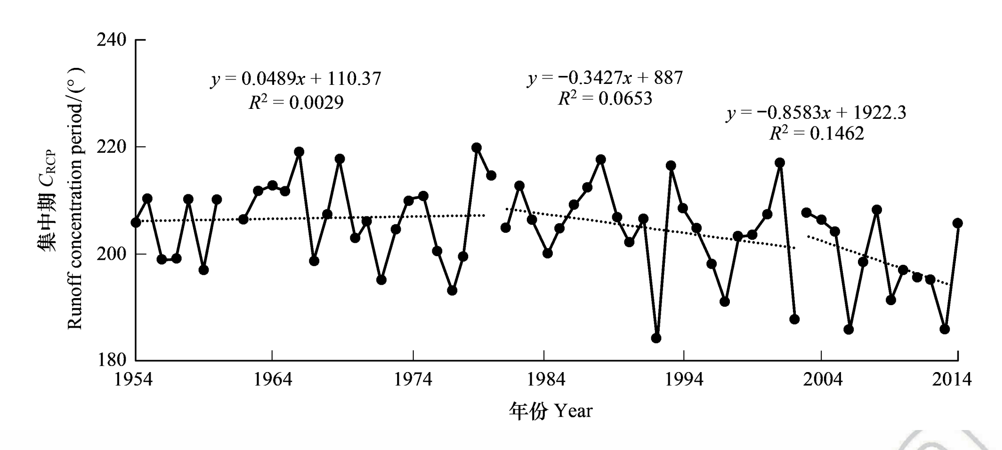


图 4　宜昌站(1954—2014)径流集中期年际变化图

Fig.4　Time series of annual C_{RCP} in Yichang

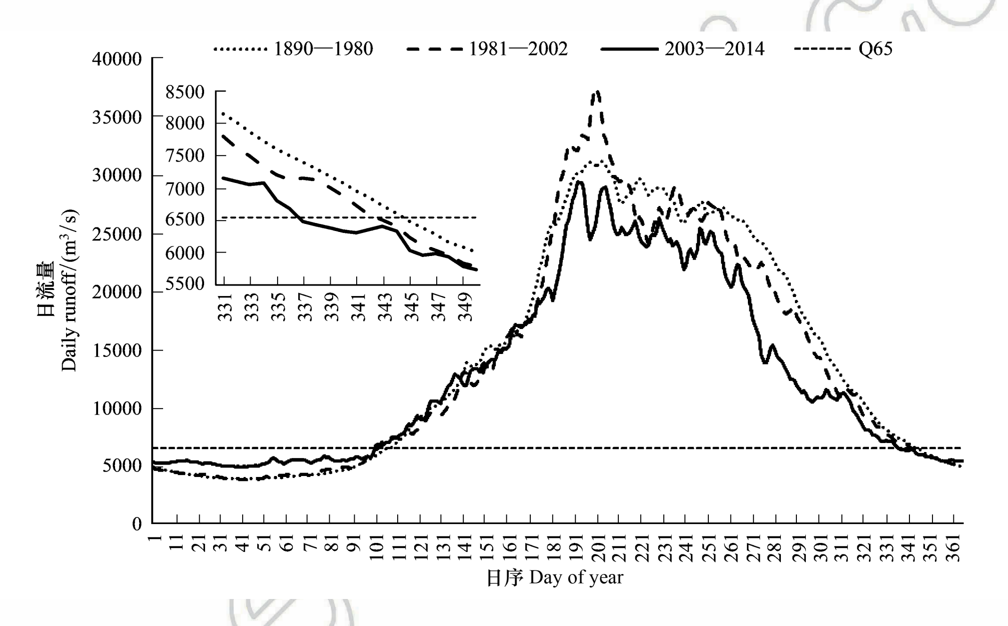


图 5　不同时期宜昌站日流量历程曲线

Fig.5　Hydrograph of daily runoff in Yichang

分配特征较接近,径流集中度约为 0.46,径流集中期出现在 8 月中上旬,与多年平均基本一致;而 2002—2014 年径流集中度约为 0.40,径流集中期出现在 7 月底,相对多年平均而言径流重心提前了约 8d(表 1)。由此可见,三峡工程对径流年内分配的影响要远远大于葛洲坝水利枢纽工程(贡献率分别为 92.03% 和 7.97%),这主要是由于葛洲坝水利枢纽属于低水头径流式水电站,径流调节能力较小[21]。从宜昌站径流流集中度下降的趋势来看,通过水利工程蓄水的调节作用,宜昌站径流在年内分布趋于平缓,洪峰被削弱,减少洪水发生的几率,这对于长江中游防洪十分有益[2]。

枯水期开始时间(一年中流量低于 6536m³/s 的开始时间)相位差和频率统计两种分析方法都表明宜昌

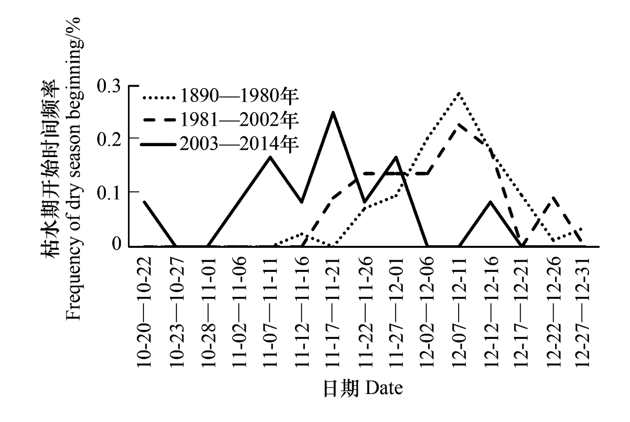


图 6　不同时段宜昌站枯水期起始时间频率统计

Fig.6　Frequency statistics of dry season beginning in Yichang

站枯水期有不同程度的提前(分别为 8d 和 20d),这可能是由于水库在汛末(10 月)蓄水,导致宜昌站提前进入枯水季节。相关研究也表明宜昌站 10 月径流减少趋势明显并且只有 2003 年一个突变点,前后平均流量相差 5100m^3/s,说明三峡工程对汛末径流量影响较大[9]。三峡工程对径流的影响主要通过蓄水进行,按照最初规划方案,蓄水从 10 月份开始,正常运行时 11 月份水位达到 175m 蓄水结束,翌年 1 月份陆续放水发电,起到了在枯季对长江中下游干流补水的作用,但也导致了水利工程下游枯水期的提前。

表 1 宜昌站径流年内分配统计特征

Table 1 Statistic characteristics of annual runoff distribution in Yichang

时段(年) Time interval	集中度 Runoff concentration degree	集中度减少量 Changes of runoff concentration degree	集中度减少贡献率 Contribution rate of runoff concentration degree	集中期 Runoff concentration period	
				合成向量方向/(°) Composition vector direction	径流重心出现时间 Occurrence time of runoff gravity center
1954—1980	0.4662			206.5802	8 月 9 日
1981—2002	0.4612	0.0050	7.97%	204.5617	8 月 7 日
2003—2014	0.4035	0.0577	92.03%	198.3514	7 月 31 日
多年平均 Annual average	0.4519	0.0627		204.2334	8 月 7 日

水利工程不利的生态影响也不能忽视。一方面,集中度降低的同时水位波动幅度也会相应减少,研究表明三峡工程的调蓄作用使得洞庭湖年内水位波动幅度减小,主要有利于较低高程的芦苇生长,生物量增大,而在较高高程的芦苇由于得不到充足的水分,生物量相对减少,逐渐被防护林代替[22],改变了流域原有的植被生长规律,而且长期的高水位和低水位以及非周期性的水位季节变动会破坏水生植被长期以来对水位周期性变化所产生的适应性,从而影响植被的正常生长繁衍和演替[23];另一方面三峡工程蓄水后,宜昌站 10 月流量有显著下降,这对于江河关系有显著影响,研究表明三峡工程运行后,洞庭湖江湖水量交换程度减弱且仍有减弱趋势[24],另一方面由于平湖和南洞庭湖湖底高程超过 26m,流量减少提前退出汛期使得长江来水在枯水期将无法进入该湖区,水量的减少会加剧这一水域的污染形势[25]。此外,蓄水导致枯水期提前对下游生态环境也可能造成了一些不利的影响,枯水期提前导致鄱阳湖候鸟保护区洲提前显露和水域缩小(图 7),将对候鸟的正常越冬产生不利影响,保护区内高程 11.5—14m 的洲滩地带是候鸟最适宜的息地,洲滩地提前显露会加速水面以上滩地失去水分和板结,当候鸟 10 月下旬至 11 月中旬迁来时,此高程范围内植物大部分已枯死,不

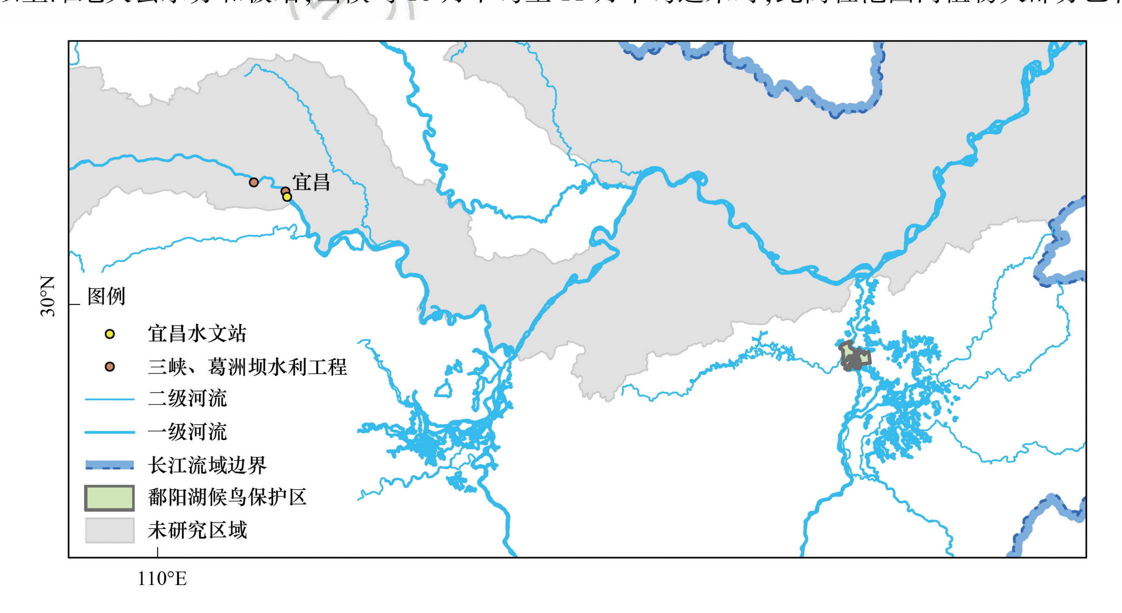


图 7 候鸟保护区区位图

Fig.7 Frequency statistics of dry season beginning in Yichang

适宜候鸟食用[26]。因此,应当优化水库调度方式,充分考虑水利工程蓄水对流域水文和生态环境的影响,结合水文气象预测结果调整调度方式,维持河道适宜环境流量,实现水资源的合理利用。

不过,三峡水库汛末蓄水时间和蓄水量的选取是一个典型的多目标决策问题,应综合考虑水库防洪、发电、航运、生态用水等多方面之间的利益与矛盾。许多学者针对水库运行方式优化进行了多方面的探索,可为三峡水库运行管理提供参考:有研究学者提出当水库汛末提前 30d 分阶段蓄水,最能充分发挥水库的综合效益[27];戴凌全等针对三峡水库蓄水对洞庭湖水位及生态的影响,建立了面向洞庭湖生态需水的水库优化调度模型,优化调度方案可使洞庭湖最小生态需水满足度不同程度提高(平水年提高 4.04%,枯水年 0.84%)[28];陈桂亚提出汛末蓄水方案为在 10 月底蓄满率达 96%,同时他还建议将寸滩 50000m^3/s 作为减淤调度启动条件,当达到减淤调度启动条件时,调度三峡水库水位日降幅在 0.5m,加大泥沙冲刷力度,实践证明减淤效果明显[8];郭文献等针对三峡工程的生态调度目标进行了研究,提出三峡工程应采取尽可能维持高水头发电的运行方式,通常三峡工程一般年份 4 月底水库水位仍处于较高水位,而防洪要求 6 月 10 日水库水位下降到防洪限制水位 145m,因而在 5 月份至 6 月上旬有较大的蓄水下泄,完全有条件实施有利于四大家鱼产卵的生态调度措施,即尽量减小采用均匀泄水原则,适时地采取洪水脉冲调度措施,以满足四大家鱼产卵繁殖所需的涨水条件,在保证不损失较大发电效益的同时有利于水库下游生态[29]。

参考文献(References):

[1] Deitch M J, Merenlender A M, Feirer S. Cumulative effects of small reservoirs on streamflow in northern coastal california catchments. Water Resources Management, 2013, 27(15): 5101-5118.
[2] 陆国宾, 刘轶, 邹响林, 邹振华, 蔡涛. 丹江口水库对汉江中下游径流特性的影响. 长江流域资源与环境, 2009, 18(10): 959-963.
[3] 孙新国, 彭勇, 周惠成. 基于SWAT分布式流域水文模型的下垫面变化和水利工程对径流影响分析. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 33-39.
[4] Xu K H, Milliman J D. Seasonal variations of sediment discharge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam. Geomorphology, 2009, 104(3/4): 276-283.
[5] 谢永宏, 陈心胜. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响. 农业现代化研究, 2008, 29(6): 684-687.
[6] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报. 北京: 水利部, 2014.
[7] 陈进, 朱延龙. 长江流域用水总量控制探讨. 中国水利, 2011, (5): 42-44.
[8] 陈桂亚. 三峡水库运行调度技术研究与实践[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
[9] 赵军凯, 李九发, 戴志军, 王一斌, 张爱社. 长江宜昌站径流变化过程分析. 资源科学, 2012, 34(12): 2306-2315.
[10] 薛杰, 李兰海, 李雪梅, 姚亚楠, 常存. 开都河流域降水与径流年内分配特征及其变化的同步性分析. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 99-104.
[11] 刘贤赵, 李嘉竹, 宿庆, 王春芝, 李希国. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究. 地理科学, 2007, 27(6): 791-795.
[12] Jiang S H, Ren L L, Yong B, Singh V P, Yang X L, Yuan F. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China using three different methods. Hydrological Processes, 2011, 25(16): 2492-2505.
[13] 张晓晓. 白龙江中上游水文气象要素变化特征分析及径流影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
[14] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 147-186.
[15] 叶守泽. 水文水利计算. 北京: 水利电力出版社, 2003: 88-89.
[16] 倪雅茜. 枯水径流研究进展与评价[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
[17] 王德瀚. 长江宜昌站枯季径流长期变化的分析. 科技通报, 1994, 10(3): 153-155.
[18] 杨艺华. 湖北宜昌: 长江进入枯水期 江滩大面积裸露. (2015-11-12)[2017-05-08]. http://news.xinhuanet.com/city/2015-11/12/c_128421980.htm.
[19] Hisdal H, Tallaksen L M, Clausen B, Peters E, Gustard A. Hydrological drought characteristics//Tallaksen L M, Van Lauen H A J, eds. Research Database. Oxford: Pergamon Press, 2004.
[20] 涂新军, 陈晓宏, 张强, 李宁. 东江径流年内分配特征及影响因素贡献分解. 水科学进展, 2012, 23(4): 493-501.
[21] 段辛斌, 陈大庆, 李志华, 王珂, 黄木桂, 刘绍平. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状. 中国水产科学, 2008, 15(4): 523-532.
[22] Sun Z D, Huang Q, Opp C, Hennig T, Marold U. Impacts and implications of major changes caused by the Three Gorges Dam in the middle reaches of the Yangtze River, China. Water Resources Management, 2012, 26(12): 3367-3378.
[23] 刘永, 郭怀成, 周丰, 王真, 黄凯. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法. 生态学报, 2006, 26(9): 3117-3126.
[24] 陈虞平. 三峡水库运用后长江与洞庭湖水沙交换的变化及响应[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.
[25] 邝凡荣. 浅析长江三峡工程对洞庭湖区生态环境的影响. 湖南农业科学, 2001, (1): 11-12.
[26] 吴龙华. 长江三峡工程对鄱阳湖生态环境的影响研究. 水利学报, 2007, (S1): 586-591.
[27] 彭杨, 李义天, 张红武. 三峡水库汛末蓄水时间与目标决策研究. 水科学进展, 2003, 14(6): 682-689.
[28] 戴凌全, 毛劲乔, 戴会超, 王煜, 张培培. 面向洞庭湖生态需水的三峡水库蓄水期优化调度研究. 水力发电学报, 2016, 35(9): 18-27.
[29] 郭文献, 夏自强, 王远坤, 韩帅. 三峡水库生态调度目标研究. 水科学进展, 2009, 20(4): 554-559.